

気温計測用UV域レイリーライダーの開発

Development of a UV Rayleigh scattering lidar for measuring atmospheric temperature

福井大学・工学部

華 灯しん・小林 喬郎

Faculty of Eng., Fukui Univ.,

D. X. Hua, T. Kobayashi

Abstract. We will report the development of a Rayleigh scattering lidar system operating at 355nm to measure atmospheric temperature. The technique measures the temperature dependent Rayleigh-scattering linewidth using three-channel detectors with a Fabry-Perot etalon. From the analysis of the three integrated signal values, the Rayleigh scattering component can be separated from the Mie component and the temperature can be measured accurately. Calculation result shows that the temperature accuracy of 2 K is realized up to a height of 6 km for a range resolution of 100 m with a 100-shot average and a laser output energy of 15 mJ using a 0.4-m diameter telescope.

1. まえがき

重要な大気パラメータである大気温度に対する遠隔計測技術の必要性が高まってきた。レイリーライダーでは、大気分子の熱運動によるレイリー散乱のスペクトル広がりを観測して、温度を求めている。この方法はミー散乱による大気変動の影響が少なく、また大気の透過率の影響を受けず、こうして散乱断面積が大きいので高感度測定が期待できる。最近、A. Tepleyらにより、FPエタロンを用いて、大気温度を求めた実験が行われている^[1]。さらに、清水とSheらは、二つの原子吸収蒸気フィルタを使用したレイリーライダー技術を検討し、光源に波長可変色素レーザーを用いたライダーシステムにより、高度1~5kmにおいて精度8~14Kを得ている^{[2]~[5]}。

本研究では、一つのFPエタロンを使用し、三つのチャンネルの散乱光信号を検出することにより、ミー散乱の影響を取り除く分光方法を検討した。または、UV域波長を選ぶことにより、レイリー散乱強度が増大するため、SNRの増大が可能で、さらに目に安全なシステムが構成できることが特長である。

2. 基本動作原理

温度計測用UV域レイリーライダーシステムの構成をFig. 1に示す。シーディングによる狭帯域1.06 μmのNd:YAGパルスレーザービームを第2、第3高調波発生素子によって355nmの波長に変換し、大気中に送信する。受信系には一枚のFPエタロンを使用し、エタロンの中心透過波長の入射角依存性によって、三つのフィルタチャンネルとして用いる。レイリー及びミー散乱光のスペクトルの特性をFig. 2に示す。PMTで散乱信号光を検出し、コンピュータで処理し、温度が求められる。

(1). スペクトル関数

ミー及びレイリー散乱光のスペクトル形状関数 $f_i(\nu)$ は

$$f_i(\nu) = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2\pi}\Delta\delta_i} \exp\left\{-\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\delta_i} \times 2\sqrt{\ln 2}\right)^2\right\} \quad (i = p, m) \quad (1)$$

と与えられる。ここで $\Delta\delta_i$ は信号光スペクトルの半値幅(FWHM)で、ミー散乱に対する $\Delta\delta_p$ はパルスレーザーの線幅とほぼ等しい。レイリー散乱の $\Delta\delta_m$ は大気温度の関数で、次式で与えられる。

$$\Delta\delta_m = 7.18 \times 10^{-7} \times \nu_0 \times \sqrt{T/M} \quad (2)$$

ここで、 ν_0 はレーザーの周波数、Tは大気絶対温度、Mは大気平均分子量である。

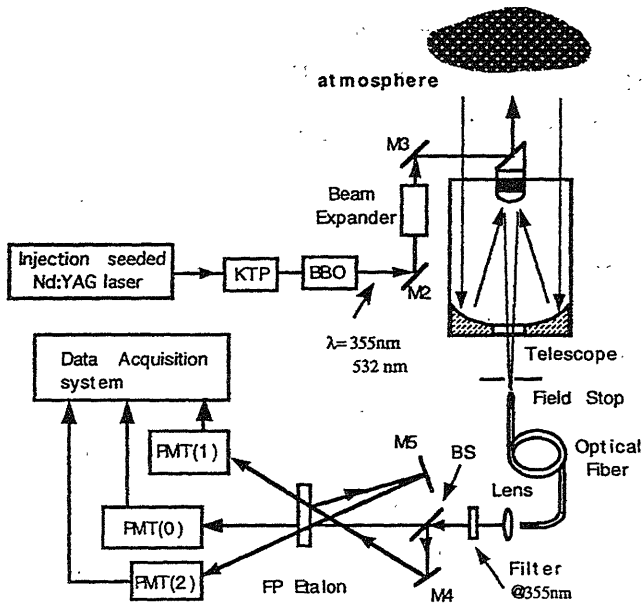


Fig. 1. Block diagram of UV Rayleigh lidar for measuring atmospheric temperature

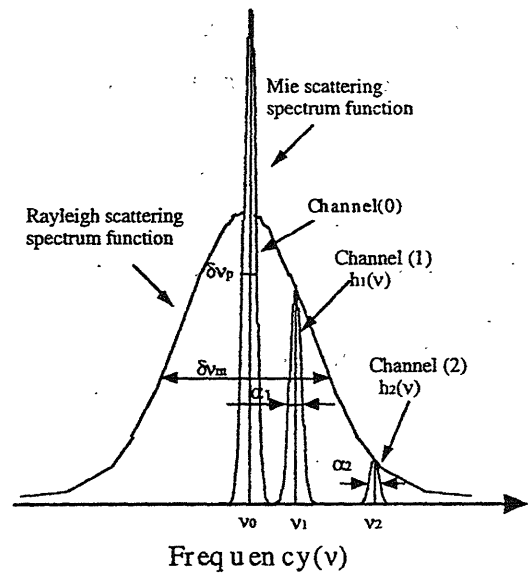


Fig. 2. Spectral distribution of the Mie/Rayleigh scattering returns and the three-channel filter

各フィルタチャンネルの透過率 $T_j(\nu)$ は次式で表される

$$T_j(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} h_j(\nu - \nu') f(\nu') d\nu' \quad (j = 0, 1, 2) \quad (3)$$

ここで、 $h_j(\nu)$ は各フィルタチャンネルの透過スペクトル関数（ローレンツ型）である。フィルタチャンネル1,2を通過するの光子数 $N_1(z)$ 、 $N_2(z)$ はミーとレイリー散乱による光子数に分けられ、次式で与えられる。

$$N_1(z) = T_1(\nu_1)N_m(z) + T_1(\nu_0)N_p(z) \quad (4)$$

$$N_2(z) = T_2(\nu_2)N_m(z) + T_2(\nu_0)N_p(z) \quad (5)$$

ここで、 $N_m(z)$ 、 $N_p(z)$ は受信光におけるレイリーとミー散乱光の光子数で、 z は大気の高さである。(4)式と(5)式の右の第2項はミー散乱の光子数項であり、ミー散乱のチャンネル（すなわち Fig.2.におけるch(0)である）で計測したミー散乱の強度により取去できる。これより(4)式と(5)式の比を取り、大気の高さを求める。

(2). 測定感度及び測定精度

チャンネル1,2の温度の変化率、すなわち感度 S_1, S_2 は、(4)、(5)式をそれぞれ温度で微分することによって次式より得られる。

$$S_1 = \frac{dN_1}{N_1 dT} = -\frac{1}{2T} + \frac{k^2(\nu_1 - \nu_0)^2}{\nu_0^2 T^2} \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{dN_2}{N_2 dT} = -\frac{1}{2T} + \frac{k^2(\nu_2 - \nu_0)^2}{\nu_0^2 T^2} \quad (7)$$

ここで、定数 $k = 1.25 \times 10^7$ 、 ν_1, ν_2 はそれぞれチャンネル1、2の透過中心周波数、 ν_0 はレーザーの中心周波数、 T は大気の高さである。総合的な感度 S_T は $S_T^2 = S_1^2 + S_2^2$ と表される。Fig. 3.にはフィルタチャンネルの周波数シフト $(\nu - \nu_0)$ と感度の依存性を示す。

さらに、光子計数検出法を用いた場合の各チャンネルの信号対雑音比S/Nを求めた。^[6] 温度に対する計測誤差 δT は次式で与えられる。

$$\delta T = \frac{1}{\sqrt{[S \cdot (S/N)]}} \quad (8)$$

表1. システムのパラメータ

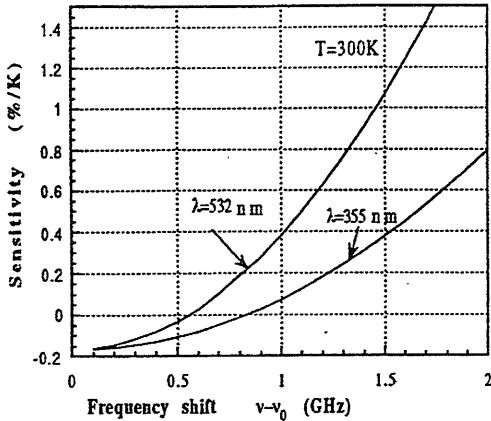


Fig. 3. Temperature Sensitivity of the Rayleigh scattering for the signal frequency to the laser frequency

光源:	狭帯域Nd:YAGレーザー
波長(出力):	532nm (30mJ), 355nm (15mJ)
第3高調波の線幅:	0.3 GHz
受信系:	
望遠鏡の直径:	40 cm
光学系の効率:	0.2
エタロンの半値幅:	0.2 GHz
光学フィルタの帯域幅:	0.1 nm @ 355nm
検出器:	フォトンカウンティング
量子効率:	0.17, 0.4
ダークカウント(1/s):	100

3. シミュレーション結果

355nm, 532nmの二つの波長で温度に対する計測誤差のシミュレーションを行った。システムの条件を表1に示す。Fig. 4. には、標準大気モデルによって計算した後方散乱光の受信光電子数の大気高度の依存性を示す。さらに、(6)~(8)式によって、フィルタチャンネル1, 2の周波数はレーザーの中心周波数との周波数シフトがそれぞれ、波長355nmの場合には0.9 GHz, 1.5 GHzに設定し、波長532nmの場合には0.5 GHz, 1.0 GHzと設定して、大気温度300 Kに対する総合測定感度 S_T は355nmでは0.38%/K, 532nmでは0.40%/Kと求められた。次に、ライダーのSNRの高度依存性と温度に対する計測誤差も求めた結果をFig.5と6に示す

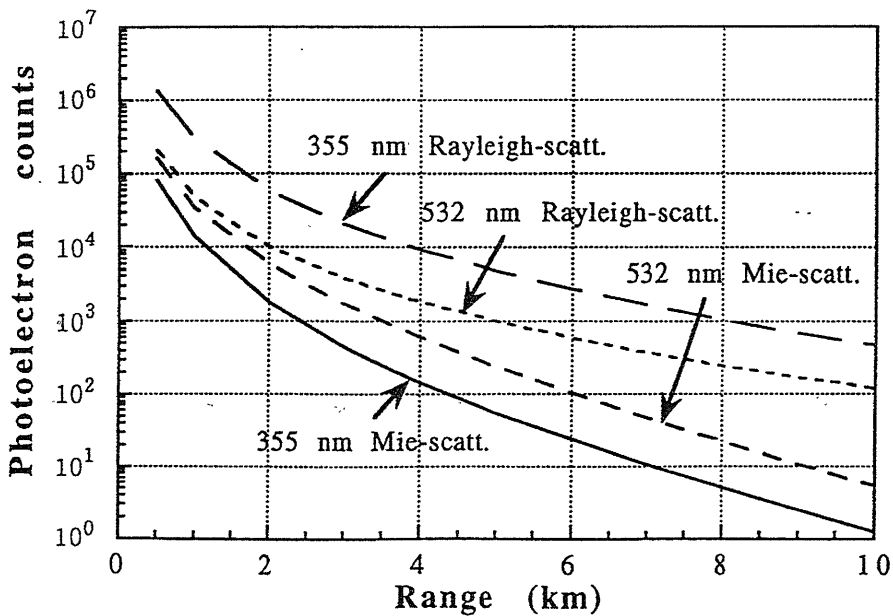


Fig.4. Simulation of the detected photoelectron counts for signal return from the atmosphere at 355nm and 532nm, Results are for a 100-shot average, a range resolution of 100 m.

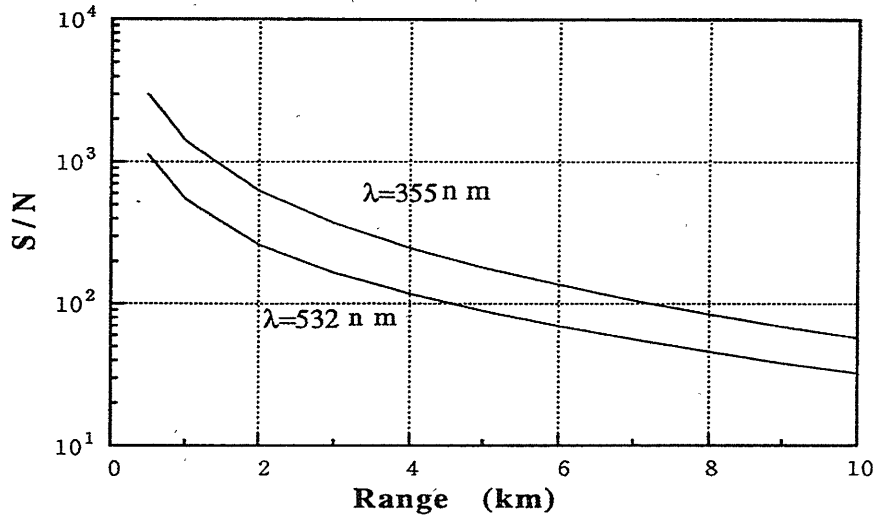


Fig. 5. Signal-to-noise ratios computed for Rayleigh scattering at 300K atmospheric temperature. Results are for a 100 shot average and a range resolution of 100 m

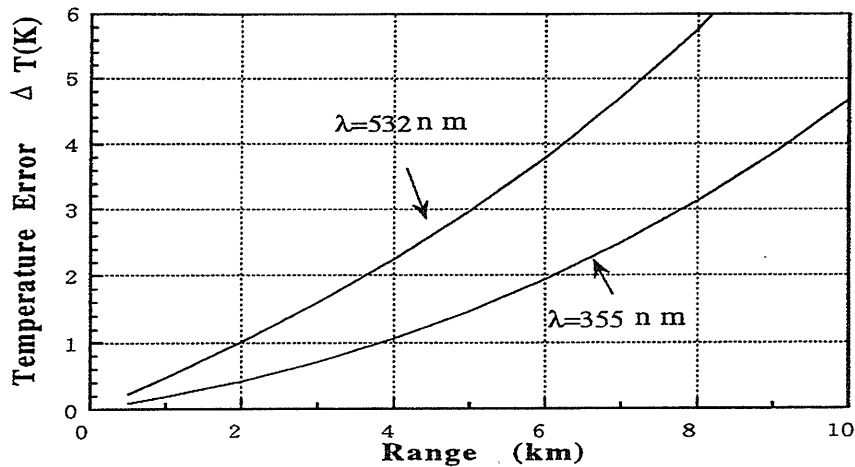


Fig. 6. Temperature errors as a function of range. Result are for a 100 shot average with a range resolution of 100 m

4. むすび

以上の検討によりUV域レイザーライダーは低層対流圏での気温に対する高精度計測が可能なものと考えられると見られる。今後は風によるドップラーシフトの影響も詳しく検討して、高精度な気温の計測を可能にしたい。

References:

- (1). Craig A. Tepley, etc, IEEE Trans. on Geos. and Remote Sensing 31, 36-47 (1993)
- (2). M.L. Chanin, etc, Geophys. Res. Lett. 16, 1273-1276 (1989)
- (3). H. Shimizu, S.L. Lee and C.Y. She, Appl. Opt. 22, 13730-1381 (1983)
- (4). C.Y. She, R.J. Alvarez II, etc, Opt. Lett. 17, 541-543 (1992).
- (5). H. Shimizu, K. Noguchi, and C.Y. She., Appl. Opt. 25, 1460-1466 (1986).
- (6). David Rees and I. Stuart McDermid, Appl. Opt. 29, 4133-4143 (1990)